

— 論文 —

四万十川から供給される栄養塩が土佐湾西部沿岸海域の 栄養塩分布と基礎生産の季節変化に及ぼす影響*

和 吾郎†・木下 泉‡・深見 公雄**

要 旨

四万十川が土佐湾西部海域の基礎生産に及ぼす影響を明らかにするため、2005年の1–12月に四万十川からの栄養塩供給量と土佐湾及びその周辺海域表層の栄養塩、クロロフィル *a* の季節変化を調べた。四万十川下流部における栄養塩の年平均の N:P:Si 比は 160:1:1820 となり、珪藻類の元素組成に比べて $Si > N > P$ の特徴を示した。沿岸海域の栄養塩とクロロフィル *a* の季節変動は概ね循環期(11–4月)に増大し、成層期(5–10月)に減少する傾向が見られた。成層期の海域の N:P:Si 比は珪藻類の元素組成比に対して窒素が少なかったことから、それが制限因子と考えられた。その中で四万十川河口に近い観測点では成層期も栄養塩が相対的に豊富に存在し、クロロフィル *a* の低下は見られなかった。この観測点のケイ酸塩や硝酸塩+亜硝酸塩の変動は四万十川からのそれらの供給量の変動に対応しており、成層期では四万十川からの栄養塩供給によって基礎生産が維持されると考えられた。

キーワード：四万十川，栄養塩，土佐湾，基礎生産，N:P:Si 比

1. はじめに

沿岸海域表層部への栄養塩の供給は湧昇や河川によってもたらされ(松田ら, 1995), これらは古くから沿岸海域の基礎生産を向上させることが報告されてきた(e. g. Anderson, 1964; Gilmartin and Revelant, 1974)。特に貧栄養海域では、例えば地中海とアスワンハイダム建設前のナイル川との関係に見られたように、河川からの栄養塩供給がその基礎生産力を高める上で大きな影響を及ぼしていた(Halim, 1960)。河川はこのよう

に沿岸海域の基礎生産に対して重要な役割を果たす一方で、その流域環境の変化は沿岸域の生態系を攪乱させる様々な変化をもたらしている(宇野木, 2005)。栄養塩に関していえば、人為的要因による窒素、リン負荷の増大や河川横断構造物の建設によるケイ素の減少は、それらの存在比を変え、基礎生産構造に変化を及ぼしたと考えられている(Rabalais *et al.*, 1996; Humborg *et al.*, 1997)。このような変化は高次生産にも影響を及ぼし得ることが指摘されている(山本, 2005)。

四国南岸に位置する土佐湾は開放的な湾で、四国南方の沖合を東流する黒潮の影響を強く受ける水域である(高知県水産試験場, 2004)。黒潮は貧栄養な海流として知られ、その基礎生産性は低く、クロロフィル *a* 濃度で $0.1\text{--}0.3 \mu\text{g L}^{-1}$ の値が報告されている(e. g. Saijo and Ichimura, 1960)。このような黒潮影響下にある土佐湾の基礎生産について、近年では市川・広田(2004)

* 2007年9月12日受領；2008年6月2日受理

著作権：日本海洋学会, 2008

† 株式会社 西日本科学技術研究所

〒780-0812 高知市若松町 9-30

主著者 e-mail address : nigi@ule.co.jp

‡ 高知大学総合研究センター海洋生物教育研究施設

〒781-1164 土佐市宇佐町井尻 194

** 高知大学大学院黒潮圏海洋科学研究科

〒783-8502 南国市物部乙 200

が湾中央部における観測結果を示しており、成層が発達する時期においても、黒潮流軸の変動に伴う断続的な湧昇の発生によって栄養塩が下層から垂表層に供給され、それが基礎生産の向上に貢献することを報告している。また、兪・中田(2002)は塩分、透明度、土佐湾に注ぐ主要3河川(四万十川、仁淀川、物部川)の流量データから、河川水の流入が土佐湾の基礎生産量の変動要因となっている可能性を示している。それ故、河川から供給される栄養塩が土佐湾の基礎生産を左右する重要な要因となっていることが推測されるものの、河川からの栄養塩供給量や河口沖での栄養塩濃度の測定など両者の関連を調べた事例は報告されていない。

四国南西部に位置し土佐湾西部沿岸海域に流れ込む四万十川は、流程 196 km、流域面積 2,270 km² を有し、土佐湾に注ぐ河川のうち最大規模の河川である(伊藤, 1990)。下流部の過去 10 年間(1993–2002 年)の年平均流量は 78–249 m³ s⁻¹ であり、これは同時期の仁淀川(58–184 m³ s⁻¹)や物部川(11–49 m³ s⁻¹)に比べて多く、土佐湾に最大の河川水量を供給している(国土交通省ホームページ 水文水質データベース)。その他に四万十川流域は、土地利用の 90%近くを森林が占めることや、流域の人口密度は 30 人/km² 程度であること、主な河川横断構造物としては高さ 8 m の堰堤が 1 基存在することなどの特徴を持つ(大野, 2002)。四万十川と沿岸海域の生物生産との関連については、Kimura and Naganuma (1991) が陸域から供給される有機物が腐食連鎖の重要な役割を担っていることを示唆しているものの、河川からの栄養塩供給に伴う典型的な植物プランクトンを出発点とした生食連鎖については報告例がない。

高知県(2001)によれば、四万十川が注ぐ土佐湾西部沿岸海域(東端を興津岬、西端を足摺岬と定義)には 20 河川が流入している。四万十川を除く 19 河川の流量や栄養塩濃度に関する報告例はないものの、流量と密接な関係にある流域面積では(高橋, 1990)、四万十川流域が土佐湾西部沿岸海域に注ぎ込む全河川の流域面積の 88%を占めており(高知県, 2001)、当水域に河川が及ぼす影響の大半は四万十川によるものと判断できる。また、土佐湾外の足摺半島西側に注ぐ 3 河川についても、それらの全流域面積は四万十川流域の 1%に過ぎず

(高知県, 2001)、土佐湾西部沿岸海域から足摺半島周辺海域にかけて四万十川と比較し得る影響力を持つ河川の流入はない。土佐湾西部沿岸海域は黒潮本流がしばしば足摺半島に接近するなど、土佐湾の中でも黒潮の影響を強く受ける水域と考えられ、河川による沿岸海域の基礎生産への影響を検討するためには適した環境下にある。そこで、本研究では四万十川とそれが注ぐ土佐湾西部沿岸海域から相対的に流域規模の大きな河川の流入がない足摺半島西側海域までを対象とし、河川からの栄養塩供給量と海域における栄養塩濃度及びクロロフィル *a* 濃度の水平分布、季節変化を調べ、河川が、貧栄養下にあると考えられる沿岸海域の基礎生産に及ぼす影響について検討した。

2. 材料と方法

沿岸海域の採水は、足摺半島西側から土佐湾西部沿岸海域にかけての海岸線に沿った土佐湾内 4 地点(Sta. A4–A7)と湾外 3 地点(Sta. A1–A3)の計 7 地点で、2005 年 1 月から 12 月まで月 1 回の頻度で計 12 回行った(Fig. 1)。試水は河川水の影響をみるため表層水をバケツで採取した。土佐湾内と足摺半島突端の各観測点における四万十川河口からの距離は、Sta. A3: 29 km, Sta. A4: 19 km, Sta. A5: 10 km, Sta. A6: 3 km, Sta. A7: 10 km ほどである。また、海域の採水時に合わせて、四万十川本川の海水の混入しない下流部(Sta. R1, 河口から約 10 km)で表層水を採取した。試水は洗浄済みのポリエチレンボトルに海水 2 L, 河川水 250 ml を採取し、調査終了まで冷蔵保存した。

分析項目は海水、河川水ともに硝酸塩+亜硝酸塩、リン酸塩、ケイ酸塩の各栄養塩とし、海水のみクロロフィル *a* も分析した。海水の試水は採取後 12 時間以内に Whatman GF/C フィルターを用いてろ過し、ろ液は栄養塩分析に、ろ紙はクロロフィル *a* の分析にそれぞれ供した。河川水も GF/C フィルターを用いてろ過し、ろ液を栄養塩分析に供した。ろ過後、速やかに Parsons *et al.* (1984) に従って硝酸塩+亜硝酸塩(銅カドミウム還元ナフチルエチレンジアミン法)、リン酸塩(モリブデン青法)、ケイ酸塩(モリブデン青法)をそれぞれ比色定量した。クロロフィル *a* は 90%アセトン溶液で抽出

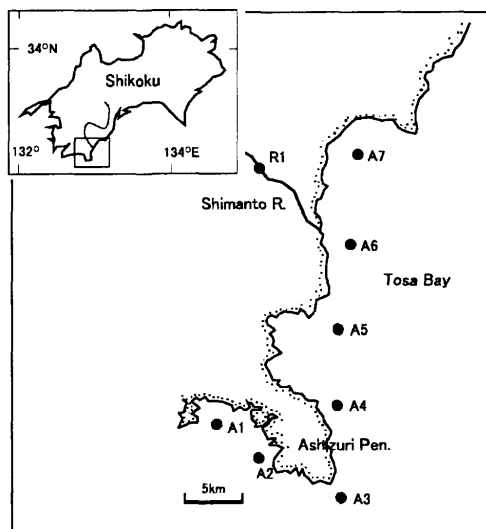


Fig. 1. Map showing sampling stations located in the Shimanto River (Sta. R1), in the western Tosa Bay (Sta. A4–A7) and outside of the bay (Sta. A1–A3).

後、三波長測定法により測定した。

海水は CTD センサー (Alec 電子製, AST500-P) により塩分を測定した。

四万十川から供給される栄養塩の沿岸海域への影響をみるために、日河川流量に各栄養塩の濃度を乗じて日供給量を算出した。なお、2005 年の日河川流量は不明であったため、国土交通省水文水質データベース (国土交通省ホームページ) より具同観測所 (Sta. R1) の 2002 年の日平均河川水位と日平均河川流量データから水位–流量曲線式 ($Q = 123 \times (H + 1.25)^2$, Q : 日平均河川流量 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) H : 日平均河川水位 (m), $r=0.984$, $p < 0.001$) を求め、それに 2005 年の具同観測所 (Sta. R1) の日平均河川水位データ (国土交通省ホームページ水文水質データベース) を代入して日河川流量を推定した。栄養塩濃度は各月で測定した濃度をその月間の栄養塩濃度とした。

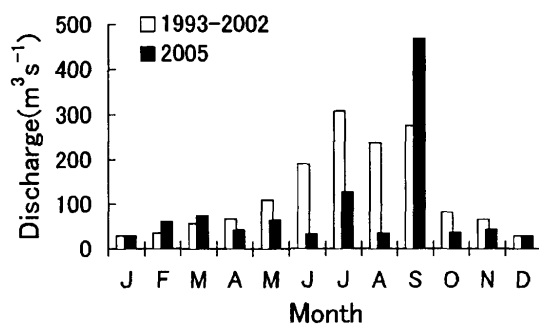


Fig. 2. The monthly average discharge from the Shimanto River into Tosa Bay between 1993–2002 and 2005. The discharge data during 1993–2002 were cited from the website of Ministry of Land, Infrastructure and Transport Japan. The discharge data in 2005 were calculated by utilizing water level dataset of the website in 2005 and H-Q parameter model in 2002 at Sta. R1.

3. 結果

3.1. 四万十川の推定流量と海域の塩分の推移

2005 年の推定年平均流量は $87 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ で、この値は 1993–2002 年の平均値 $124 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ の 70%であった。2005 年の各月の平均流量は $30\text{--}468 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ の範囲にあり、9 月が最大、1 月および 12 月が最小であった (Fig. 2)。2005 年と 1993–2002 年の各月の平均流量とを比べると、2005 年は 2–3 月、9 月が多く、それ以外は同等以下であり、特に 4–8 月、10 月が例年に比べて 15–63%と少なかった (Fig. 2)。通常、高知では 6–10 月の間は梅雨～台風接近に伴って多雨となり、1993–2002 年の月平均では 6–9 月に流量が増加する様子が見られる。しかし、2005 年をみると、9 月の月平均流量こそ四万十川流域における各雨量観測所の 3 日間累計雨量が $467\text{--}864 \text{ mm}$ (気象庁ホームページ 気象統計情報) となる多量な降雨によって多かったものの、6 月、8 月では、通常、最小流量となる 1 月、12 月と同程度であった。

全観測の表層塩分は $30.4\text{--}34.8$ の範囲にあり、四万十川河口の延長線上にある Sta. A6 が相対的に低い値で推移し、他の観測点よりも河川水の影響を強く受けている様子がわかる (Fig. 3)。Sta. A6 以外では、四万十

川河口の南側の Sta. A5 が僅かに低い塩分を観測することがあったものの、概ね他の観測点と同様の変化を示した。

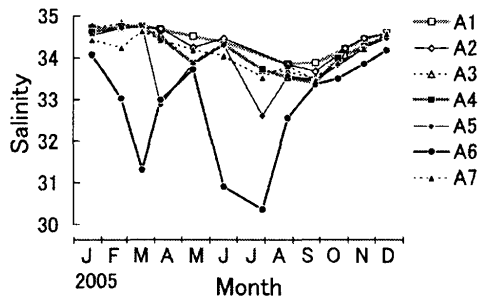


Fig. 3. Seasonal change of surface water salinity at Sta. A1–A7.

3.2. 四万十川下流部の栄養塩濃度と供給量の変動

四万十川下流部 (Sta. R1) における栄養塩濃度は硝酸塩+亜硝酸塩 $3.15\text{--}24.8\ \mu\text{M}$ (平均 $14.1\ \mu\text{M}$), リン酸塩 $0.024\text{--}0.19\ \mu\text{M}$ (平均 $0.088\ \mu\text{M}$), ケイ酸塩 $136\text{--}179\ \mu\text{M}$ (平均 $160\ \mu\text{M}$) の範囲で変動し、相対的にケイ酸塩濃度が高く、リン酸塩濃度が低かった (Fig. 4)。また、硝酸塩+亜硝酸塩及びリン酸塩は最小値と最大値の間に 8 倍程度の濃度差があったのに対し、ケイ酸塩のそれは 1.3 倍で安定した状態で推移した。季節的変動をみると、硝酸塩+亜硝酸塩濃度とリン酸塩濃度は概ね同調して推移し、2–3 月が高く、4 月以降に減少し、11 月以降に再び増加する傾向が見られた (Fig. 4)。一方、ケイ酸塩濃度は、その変動幅は小さいものの 7–10 月が $170\ \mu\text{M}$ 前後と相対的に高く、12 月に減少し、硝酸塩+亜硝酸塩やリン酸塩とは異なる傾向を示した (Fig. 4)。

2005 年の四万十川から沿岸海域への各栄養塩の日供給量の推移をみると (Fig. 4), 各項目とも大きな出水があった 9 月上旬に突出して高い値を示した。それを除くと、各栄養塩とも 2 月, 3 月, 7 月が相対的に多かった。その一方で、6 月, 8 月, 10 月はいずれも少なく、これらは通常、渇水期となる 1 月, 12 月と同程度であり、少雨によって流量が少なかった影響が反映されている (Fig. 2)。

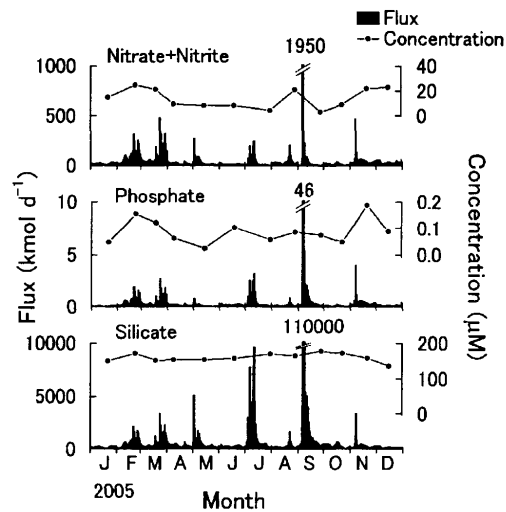


Fig. 4. Seasonal change of nutrients concentrations at Sta. R1 and nutrients fluxes of the Shimanto River into Tosa Bay.

3.3. 足摺半島西側から土佐湾西部沿岸海域にかけての栄養塩、クロロフィル a 濃度の変動

足摺半島西側から土佐湾西部沿岸海域にかけての硝酸塩+亜硝酸塩, リン酸塩, ケイ酸塩及びクロロフィル a 濃度の各観測点における経月変化を Fig. 5 に示した。

各観測点の硝酸塩+亜硝酸塩濃度の変動をみると、一般的に 1–3 月, 12 月に相対的に高く、概ね $2\text{--}3\ \mu\text{M}$ 程度存在した。5–10 月の硝酸塩+亜硝酸塩濃度は各観測点とも明瞭に減少し、最高値は 5 月観測時の四万十川河口に近い Sta. A6 における $1.28\ \mu\text{M}$ であり、また、Sta. A6 では他の観測点よりも相対的に高い状態で推移した。5–10 月の Sta. A6 を除いた土佐湾内 (Sta. A4, Sta. A5, Sta. A7) と湾外の足摺半島西部側 (Sta. A1–A3) とを比べると、両水域に明瞭な差は見られず、各観測点とも概ね $0.5\ \mu\text{M}$ 以下であった。両水域で明らかな違いが見られたのは 4 月であり、Sta. A6 を除く土佐湾内は湾外よりも低濃度であった。

リン酸塩濃度の全般的な傾向も硝酸塩+亜硝酸塩と同様に 1–3 月と 12 月に相対的に高く、 $0.1\text{--}0.3\ \mu\text{M}$ 程度存在した。また、この期間は観測点間に明瞭な濃度差は見られなかった。5–10 月は硝酸塩+亜硝酸塩と同様

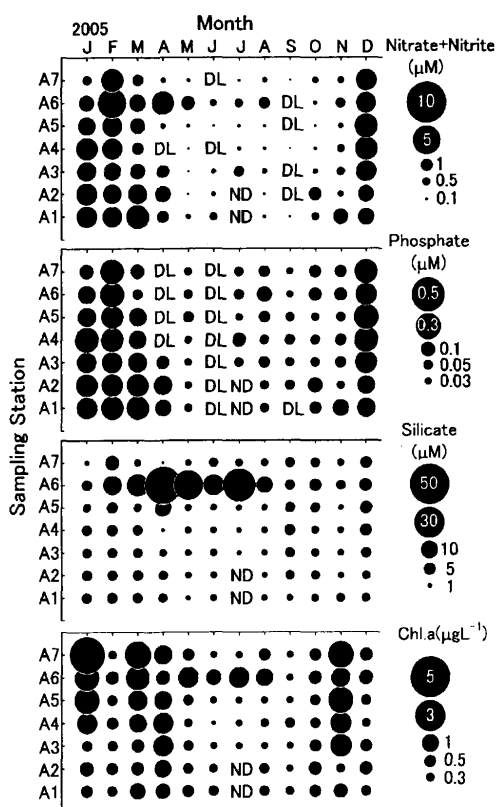


Fig. 5. Seasonal change of surface water nutrients and Chl. *a* concentrations at Sta. A1–A7. DL: below the Detection Limit, ND: No Data.

リン酸塩濃度は相対的に低い状態で推移し、Sta. A6 についても他の観測点との差は見られなかった。土佐湾内と湾外を比べると、硝酸塩+亜硝酸塩と同じく4月に明瞭な濃度差が見られ、湾外では $0.1 \mu\text{M}$ 程度存在したものの、土佐湾内は枯渇もしくはそれに近い状態 ($<0.03 \mu\text{M}$) であった。

ケイ酸塩濃度は、Sta. A6 では $3.51\text{--}43.5 \mu\text{M}$ の範囲で変動し、年間を通して他の観測点よりも明瞭に高い水準で推移した。Sta. A6 をみると、4–7月に相対的に高くなる季節変動を示し、硝酸塩やリン酸塩と異なる傾向が見られた。他の観測点は硝酸塩やリン酸塩と同様に1–3月、12月に相対的に高くなった。また、Sta. A6 を除いた土佐湾内と湾外とを比べると、両水域に差は見られず、1–3月、12月は平均的に $3\text{--}5 \mu\text{M}$ 程度が存

在し、5–8月には概ね $2 \mu\text{M}$ 以下まで低下した。

クロロフィル *a* 濃度は、Sta. A6 を除くと1–4月、11–12月に相対的に高く、5–10月に低下し、その季節的消長は概ね栄養塩と同様の傾向を示した。栄養塩が多く存在した1–3月、12月の土佐湾内と湾外とを比べると、2月と12月では大差がないものの、1月と3月は土佐湾内が相対的に高い水準にあり、四万十川河口北側の Sta. A7 の1月では最高値となる $4.0 \mu\text{g L}^{-1}$ を観測した。5–10月にかけては、Sta. A6 を除く土佐湾内でのクロロフィル *a* 濃度は $0.1\text{--}0.5 \mu\text{g L}^{-1}$ 、湾外では $0.2\text{--}0.6 \mu\text{g L}^{-1}$ の範囲で変動し、両水域間で明瞭な濃度差がなく推移した。Sta. A6 に注目すると、1–4月、11–12月では他の土佐湾内の観測点と明瞭な差は見られなかったものの、他の観測点が減少した5–10月にかけては、9月を除くと $0.6\text{--}1.4 \mu\text{g L}^{-1}$ の範囲にあり、1–3月、12月の水準に対して大幅な低下は見られなかった。

4. 考察

4.1. 四万十川下流部の栄養塩濃度の変動と沿岸海域への栄養塩供給比

四万十川下流部 (Sta. R1) の栄養塩濃度の季節変動は硝酸塩+亜硝酸塩とリン酸塩の増減が同調して推移する傾向が見られ (Fig. 4)、両者は高い相関性を示した ($r = 0.669, p < 0.05$)。硝酸塩+亜硝酸塩及びリン酸塩濃度は、流域の地質、土壌、植生状態など自然的要因や、生活排水、農業排水の流入など人為的要因によって左右され (e. g. Horne and Goldman, 1994)、硝酸塩+亜硝酸塩濃度とリン酸塩濃度の変動傾向に類似性が見られる場合には、人為的要因により濃度が変化する可能性を示している (浜端, 1989)。森林集水域のような人為的な汚染を受けていない河川の硝酸塩+亜硝酸塩及びリン酸塩濃度はそれぞれ $4\text{--}14 \mu\text{M}$ 、 $0.3 \mu\text{M}$ 程度といわれており (Wetzel, 2001)、それと比べると四万十川の平均的な水準は、硝酸塩+亜硝酸塩はこの上限に相当し、リン酸塩は低い (Fig. 4)。このことから、四万十川下流部の硝酸塩+亜硝酸塩及びリン酸塩濃度は人為的要因によって変動していると考えられたものの、流域面積に占める農地や宅地の割合が低く人口密度が $30 \text{人}/\text{km}^2$ 程度の四万十川流域では (大野, 2002)、

人為的要因が及ぼす影響の程度は強いとはいえない。

硝酸塩+亜硝酸塩の濃度変化は降雨との関連も深く、森林集水域では降雨時に硝酸塩+亜硝酸塩を高濃度に含む土壌水が河川や地下水に流出し (Edwards, 1973), 降雨前より降雨後に濃度が高くなる特徴が見られる (平田・村岡, 1988)。それ故、北東アメリカやヨーロッパでは乾燥する夏期に相対的に低濃度となる場合があるのに対し (e. g. Fichez *et al.*, 1992), 本邦では、例えば國松・須戸 (1993) や大手 (2004) などが琵琶湖周辺水域の測定で示したように、梅雨期から秋期の多雨期に高濃度となる事例がしばしば見られる。2005 年の硝酸塩+亜硝酸塩濃度は 4-7 月、9-10 月は 3-9 μM の相対的に低い水準で推移しており (Fig. 4), これは例年に比べて降雨量が少なかった影響を反映している可能性が考えられる。

ケイ酸塩濃度は他の 2 項目の増減傾向と一致しなかった (Fig. 4)。硝酸塩+亜硝酸塩及びリン酸塩濃度が人為的要因によって変動するのに対し、ケイ酸塩は自然の風化溶出が水域への供給の大半を占める (原島, 2003)。陸水域におけるケイ酸塩濃度の変動要因としては、近年、ダムや湖沼といった止水域における珪藻類の増殖との関連が指摘されており、珪藻類のケイ酸塩の摂取、死滅、沈降によって止水域下流側の濃度が減少することが報告されている (Humborg *et al.*, 1997; Harashima *et al.*, 2006)。ケイ酸塩は、森林集水域では降雨ピーク時に一時的に濃度の減少が見られるものの、硝酸塩に比べて変化は小さく、早期に降雨前の水準に戻ることが報告されている (平田・村岡, 1988)。以上のことから、四万十川のケイ酸塩が安定して高水準にあることは、大規模な河川横断構造物が存在しないことや森林が 90% 近くを占める流域の環境特性と関係が深いといえる。

四万十川下流部の各栄養塩の年平均値の N:P:Si 比を求めると、160:1:1820 となる。Justic *et al.* (1995) によれば、富栄養化した河川のそれは、例えばミシシッピ川で N:P:Si=15:1:14, ポー川では N:P:Si=37:1:26 となり、ケイ素に対してリンまたは窒素の値は高くなる。それらに比べて四万十川の N:P:Si 比はリンが少なく、ケイ素が多いことがわかる。これについて、沿岸海域の珪藻類の体内元素組成を Redfield *et*

al. (1963) や Libes (1992) に従って N:P:Si=16:1:15 と考えれば、四万十川から沿岸海域へは珪藻類の栄養塩要求に対して窒素やケイ素、特にケイ素が豊富に供給されているといえる。

各栄養塩の供給量は流量変動との対応が見られることから (Fig. 2, Fig. 4), 降雨量が関与しており、また、栄養塩濃度も前述のとおり降雨に伴って変動する。しかし、各月の採水は概ね晴天時で実施しており、その測定値を月間濃度として供給量を見積もったため、Fig. 4 で示した供給量には降雨時における濃度変化が反映されていない。四万十川流域の場合、森林が流域の大半を占めるために、降雨に伴う各栄養塩濃度の変動は森林集水域での流出特性を反映すると考えられる。硝酸塩+亜硝酸塩濃度の森林集水域における動態は、本項で述べたように降雨後に濃度が上昇する事例が相対的に多く見られ、それに従えば、四万十川からの硝酸塩+亜硝酸塩の供給量は過小評価をしている場合がある。ケイ酸塩の降雨時流出特性は、先に述べた平田・村岡 (1988) の現象と同じく流量ピーク時に減少する事例が複数報告されており (e.g. 勝山ら, 1998), それによれば四万十川からのケイ酸塩供給量は降雨時に過大評価をしている可能性が高い。リン酸塩については、平田・村岡 (1988) や駒井 (2004) は降雨時の流出特性に明瞭な特徴は見出し難いとしている。また、上記に示した既往文献では、硝酸塩+亜硝酸塩はリン酸塩やケイ酸塩に比べて降雨に伴う濃度変化が大きく、降雨前の状態への回復も遅い傾向が見られ、3 者の中で最も見積もり誤差が大きい可能性が高い。

河川が沿岸海域に及ぼす影響を明らかにするためには、当然のことながら精度の高い供給量の見積もりが必要であり、今後、栄養塩供給量が増大する降雨時の動態を把握することが重要な課題として挙げられる。

4.2. 沿岸海域における循環期と成層期の栄養塩濃度とクロロフィル *a* 濃度

各栄養塩濃度とクロロフィル *a* 濃度の季節変化は、一般的に 1-3 月、12 月に高く、5-10 月にかけて低下する傾向が見られた (Fig. 5)。その中で四万十川河口に近い Sta. A6 では、リン酸塩については他と明瞭な相違は見られなかったものの、硝酸塩+亜硝酸塩、ケイ酸塩

は相対的に高濃度に存在し、特にケイ酸塩は4-7月にかけて増加しており、他の観測点と顕著な濃度差が生じた。また、Sta. A6のクロロフィル *a* 濃度についても他の観測点が減少した5-10月にかけて1-3月、12月と大差ない状態で推移し、他の観測点と異なる傾向を示した (Fig. 5)。

市川・広田 (2004) によると、土佐湾の湾央では1-2月の鉛直混合が活発となる時期に表層から底層まで一様に各栄養塩濃度は高くなり、その後、表層では栄養塩濃度が低下し始め、4-10月には枯渇もしくはそれに近い低濃度となったことが報告されている。Fig. 5に示した結果をみると、Sta. A6を除く観測点は概ね土佐湾湾央の季節変動と同調し、かつ、その表層濃度もほぼ同程度の水準にある。土佐湾湾央の観測点は河川水の影響がなく、その表層部の濃度は鉛直混合や成層化といった水温に起因した海水の流動に支配されていたことから (市川・広田, 2004)、本研究における Sta. A6を除くその他観測点の濃度や変動傾向は、土佐湾の特徴を反映した結果といえる。

ここまで述べてきたように、貧栄養な黒潮影響下にある当水域では、海水の循環期には土佐湾湾央部での観測事例と同様に栄養塩供給があるものの、成層期には全体的に表層部で栄養塩が減少し (Fig. 5)、海岸から2-3 km 程度の距離の沿岸域であっても基礎生産活動が抑制され易い状態になるといえる。Justic *et al.* (1995) は過去の調査例を参考に、各栄養塩が珪藻類の増殖を制限する水準について無機態窒素 $1 \mu\text{M}$ 、リン酸塩 $0.1 \mu\text{M}$ 、ケイ酸塩 $2 \mu\text{M}$ としている。そこで、1年間を循環期と成層期の二期に大別し、その間の各観測点における栄養塩濃度とクロロフィル *a* 濃度の平均値を算出して、上記の珪藻類生産を抑制する濃度と対比することにより、両時期における栄養塩と基礎生産との関係について検討した (Fig. 6)。なお、本研究では硝酸塩+亜硝酸塩を無機態窒素とみなし、便宜的に11-4月を循環期、5-10月を成層期とした。また、水中の栄養塩のみでは既に珪藻類に摂取された栄養塩は含まれず、それらによる活性状態、摂取速度が異なる場合は十分な検討が困難となる。ここでは摂取された栄養塩も加味することとし、珪藻類に摂取された栄養塩はクロロフィル *a* 濃度を基として、Eppley (1968) の C:クロロフィル *a*

比 (g/g)、Redfield *et al.* (1963) 及び Libes (1992) の C:N:P:Si 比 (モル比) から算出した。Eppley (1968) は栄養塩が豊富な状態の C:クロロフィル *a* 比を 30、枯渇に近い状態であれば C:クロロフィル *a* 比を 90 としており、ここでは栄養塩が豊富な循環期を前者、栄養塩が減少した成層期を後者に当てはめた。C:N:P:Si 比は $106:16:1:15$ として計算した。また、平均値を求める際、検出限界を下回っていた場合は枯渇状態とみなし、 $0 \mu\text{M}$ として計算した。

まず実測値をみると (Fig. 6)、循環期では硝酸塩+亜硝酸塩濃度は Sta. A6 が他の観測点より僅かに高く、その他の観測点では明瞭な違いは見られなかった。リン酸塩濃度については全ての観測点で大きな差違はなかった (Fig. 6)。ケイ酸塩については Sta. A6 が有意に高く (ANOVA, $p < 0.05$)、その他の観測点間には他の2項目と同様に違いは見られなかった (Fig. 6)。循環期における栄養塩の平均濃度は、低濃度の観測点でも硝酸塩+亜硝酸塩は $1.4 \mu\text{M}$ 以上、リン酸塩は $0.13 \mu\text{M}$ 以上、ケイ酸塩は $3 \mu\text{M}$ 以上存在し (Fig. 6)、各栄養塩とも珪藻類生産に対して不足はなかったと考えられる。

成層期をみると (Fig. 6)、硝酸塩+亜硝酸塩とリン酸塩は実測値の平均では各観測点とも硝酸塩+亜硝酸塩濃度は $1 \mu\text{M}$ 以下、リン酸塩濃度は $0.1 \mu\text{M}$ 以下となり低い値を示した。これに珪藻類に摂取された窒素とリンを加えると、Sta. A6 のみが $1 \mu\text{M}$ 、 $0.1 \mu\text{M}$ を上回り、他の観測点では窒素、リンともその増殖に対して不足していたと考えられる (Fig. 6)。ケイ酸塩濃度については、Sta. A6 では実測値のみで $15 \mu\text{M}$ を超えるのに対して他の観測点は実測値が $2 \mu\text{M}$ 程度であり、これに摂取された分を加えると $3 \mu\text{M}$ 近くとなった (Fig. 6)。これらをみると、Sta. A6 のケイ酸塩を除き、成層期にはいずれの観測点も栄養塩濃度が珪藻類の増殖を制限する水準まで低下していることがわかり、特に硝酸塩+亜硝酸塩とリン酸塩は不足しているといえる (Fig. 6)。

クロロフィル *a* 濃度は各観測点とも循環期が成層期に比べて多いものの、Sta. A6 では成層期でも循環期と同程度の水準を維持していた (Fig. 6)。これに対して他の観測点での成層期のクロロフィル *a* 濃度は循環期の20-60%しかなく、特に土佐湾内における低下が著しい (Fig. 6)。成層期では Sta. A6 と他の観測点のクロロ

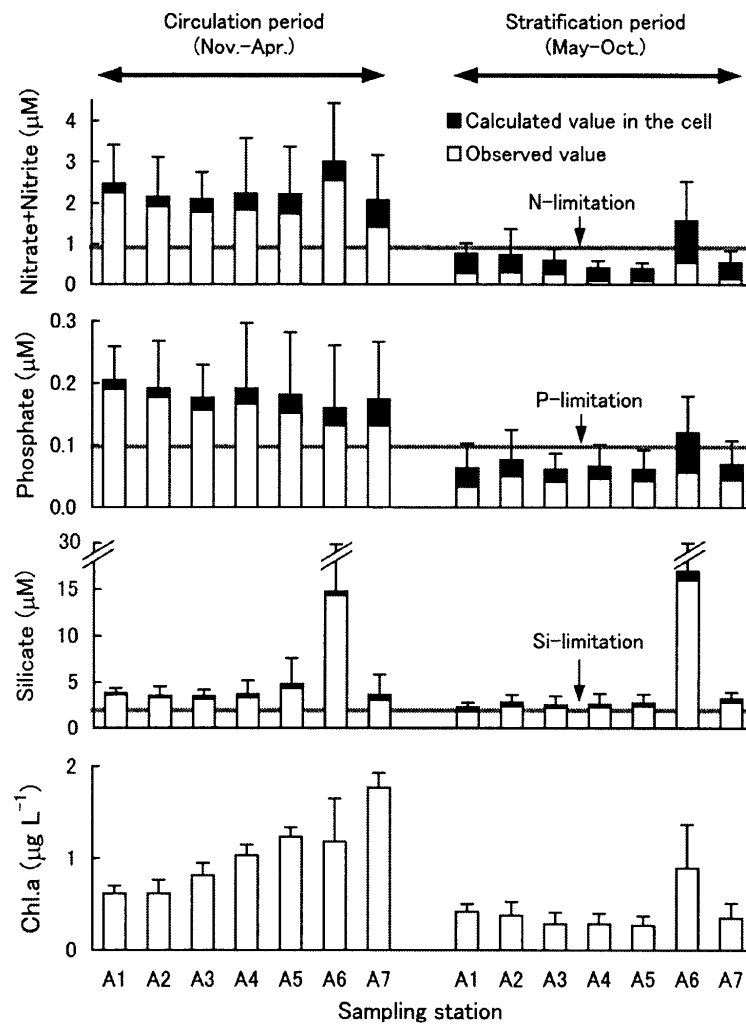


Fig. 6. Average nutrients and Chl. *a* concentrations in surface waters at Sta. A1–A7 during the circulation period (Nov. –Apr.) and stratification period (May–Oct.). The Solid lines represent potential for nutrients limitation level of diatoms growth (Justic *et al.*, 1995). Calculated values in the cell(■) are defined as nutrients concentrations taken up by diatoms, and obtained from Chl. *a* concentrations by using C : Chl. *a* (g/g) ratio (Eppley, 1968) and C : N : P : Si molar ratio (Redfield *et al.*, 1963 and Libes, 1992). Error bars represent standard deviation.

フィル *a* 濃度には 2–3 倍程度の有意な濃度差が生じており (ANOVA, $p < 0.001$), 栄養塩濃度の多寡を反映した結果となった (Fig. 6)。

4.3. 四万十川が沿岸海域の栄養塩の分布に及ぼす影響

栄養塩が相対的に豊富に存在した Sta. A6 に注目し, その栄養塩濃度に対して四万十川からの栄養塩供給が

及ぼした影響を検討した。Fig. 7 に四万十川からの各栄養塩の 1 日当たりの月平均供給量と Sta. A6 における栄養塩濃度との関係を示した。各月の平均供給量は Fig. 4 に示した日供給量の観測日前 1 か月間 (30 日間) の移動平均により求めた。なお, 2005 年 1 月の月平均供給量は 2005 年 1 月 1 日から観測日 (1 月 21 日) までの 21 日間の平均とした。Sta. A6 の栄養塩濃度は,

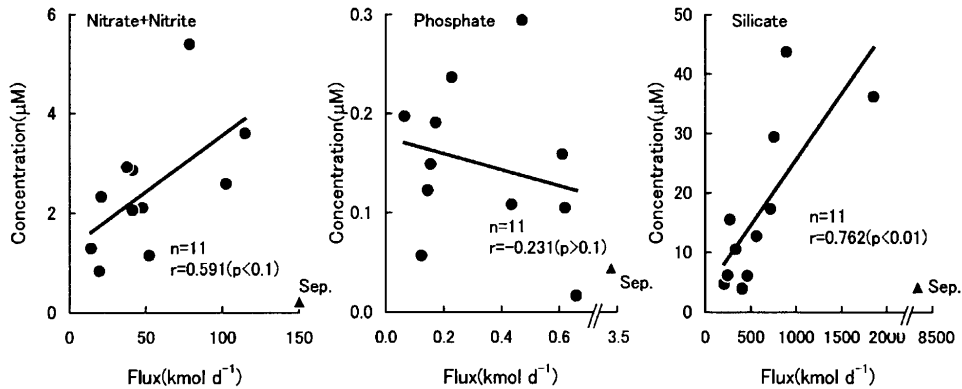


Fig. 7. Monthly correlations between nutrients fluxes of the Shimanto River and surface water nutrients concentrations at Sta. A6. Nutrients fluxes of the Shimanto River represent the running average fluxes for 30 days. Nutrients concentrations at Sta. A6 represent observed values plus calculated values in the cell (see Fig. 6 and text). The solid lines represent the linear regression lines except for data in September (▲).

Fig. 6 に示したように、実測値に推定した珪藻類摂取分を加味した値を使用した。

両者の対応をみると、四万十川からの各栄養塩供給量が大规模出水により突出して多かった9月に Sta. A6 の栄養塩濃度はいずれも最低値を示した (Fig. 7)。これについては、9月に増大した栄養塩供給量が、実際には3日間という短期間で多量の降雨の影響を強く反映したものであり、9月下旬に測定した海域での値に対して過大評価であった可能性が考えられる。前述した降雨に関わる栄養塩供給量の見積りの問題と合わせて、その評価方法については検討課題としたい。

特異的な対応を示した9月の結果を除くと、硝酸塩+亜硝酸塩とケイ酸塩は概ね四万十川からの供給量に依存して Sta. A6 における濃度が決定している様子がうかがえる (Fig. 7)。特にケイ酸塩についてはその相関係数が高いことから、河川への強い依存性を示している。一方、リン酸塩については両者の間に明瞭な関連は得られず、本結果からは河川起源のリン供給の効果は見られなかった (Fig. 7)。これら各栄養塩における河川からの供給と沿岸海域の濃度との関係は、先に述べたようにリン酸塩に対して硝酸塩+亜硝酸塩やケイ酸塩が高い比率で存在する四万十川の水質特性が反映されている。

4.4. 基礎生産に対する制限因子の推定

各栄養塩のうち基礎生産を制限する要因を推定するため、Del Amo *et al.* (1997) 及び今井ら (2000) を参考にして N:P 比と Si:N 比の散布図から検討した (Fig. 8)。ここでも循環期と成層期の二期に大別し、観測点毎に Fig. 6 に示した両時期における実測平均値の N:P 比と Si:N 比を求めた。栄養塩比から制限因子を判断する基準は、Justic *et al.* (1995) より、N:P>22, Si:P>22 であればリン制限、N:P<16, Si:N>1 であれば窒素制限、Si:P<22, Si:N<1 であればケイ素制限とした。

循環期をみると各観測点とも N:P 比は 10-22 の範囲にあり、珪藻類の体内組成とほぼ近い値をとっている (Fig. 8)。また、Si:N 比をみると、Sta. A6 は相対的に高い値を示し、他の観測点は 2 前後であったことから、いずれの観測点においてもケイ酸塩は豊富に存在していたといえる (Fig. 8)。ただし、Kudo and Matsunaga (1999) や原島 (2003) によると、珪藻類によるケイ酸塩の要求は窒素の 1-3 倍程度であることを示しており、それらによれば、Sta. A6 を除く他の観測点のケイ酸塩は過剰とはいえない。

成層期では、Si:N 比は 6-30、Si:P 比は >22 となり、硝酸塩+亜硝酸塩とリン酸塩に対してケイ酸塩が豊富に存在し、ケイ酸塩は当水域では制限因子となり難い

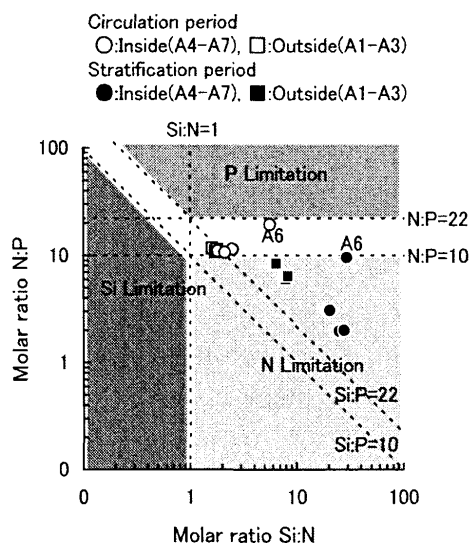


Fig. 8. Scatter diagram of average nutrient molar ratios in surface waters at Sta. A1–A7 during the circulation period (Nov. –Apr.) and stratification period (May–Oct.). Each shaded areas represent the potential limiting nutrients based on the following criteria: P Limitation, if $Si:P > 22$ and $N:P > 22$; N Limitation, if $N:P < 10$ and $Si:N > 1$; Si Limitation, if $Si:P < 10$ and $Si:N < 1$ (Justic *et al.*, 1995). N, P and Si denote nitrate+nitrite, phosphate and silicate, respectively.

と判断できる (Fig. 8)。N:P 比に注目すると、Sta. A6 では N:P 比 10 程度であるものの、他の観測点は N:P 比 < 10 となって循環期に比べて低くなり、特に土佐湾内の低下が著しいことがわかる (Fig. 8)。一般に海域の基礎生産はリンよりも窒素が制限的に作用し易い (Howarth, 1988)。日本近海においても、広島湾のように相対的に窒素負荷の強まった閉鎖性内湾ではリン制限となる場合があるものの (山本ら, 2002)、黒潮影響下にある駿河湾 (鎌谷ら, 2000) や対馬暖流水の影響下にあり信濃川や阿賀野川が注ぐ新潟沿岸 (長田, 1994)、さらに閉鎖性の強い矢野湾 (今井ら, 2000) などでも窒素が制限因子と考えられる事例が報告されている。土佐湾西部沿岸海域及び足摺半島周辺海域も 6 月など一時的にリン制限下にあった可能性はあるものの (Fig. 5)、成層期では潜在的に窒素が制限因子となる環境下にあ

ると考えられる。

芳村・工藤 (2003) は噴火湾の春季珪藻ブルーム終焉後の融雪期において、高い N:P 比と高濃度のケイ酸塩を含む河川が湾内へ注ぎ込み、それが噴火湾の新生産に関与していることを示している。本研究における土佐湾西部沿岸海域においても、四万十川が有する高い N:P 比や高濃度のケイ酸塩の供給は、土佐湾の春季ブルームが終焉したと考えられる 4 月以降の新生産に関与している可能性が示唆される。2005 年は、例年には流量が増加する梅雨期から秋季までの間、四万十川の流量が少なく四万十川河口に近い Sta. A6 のみに河川水の影響が顕れていた。それに対して和 (2004) によれば、本研究と同じ観測点である四万十川河口南側の Sta. A5 において、出水による影響が見られた 2004 年 8 月観測時の N:P 比は 15 を示していたことから、その際には四万十川から供給される栄養塩が相対的に広範囲に及んでいたと判断できる。これは、土佐湾において梅雨以降の多量の降雨に伴う栄養塩の供給が、潜在的に貧栄養な当水域の新生産を促す機能を果たしていることを示唆するものである。

5. 結論

本研究によって四万十川下流部の栄養塩の季節変動や沿岸海域への栄養塩供給比が明らかとなり、四万十川からは沿岸海域の珪藻類の体内元素構成比に対して $Si > N > P$ の特性を持って栄養塩が供給され、その比は四万十川の流域環境との関連が示唆された。

足摺半島西側から土佐湾西部沿岸海域における栄養塩の分布と季節変動から、海水の循環期には対象水域全域に表層部へ豊富な栄養塩が供給され、相対的に高いクロロフィル a 濃度が維持されていた。一方、成層期には、表層部で貧栄養な状態となってクロロフィル a 濃度が低下し、基礎生産に対して窒素が制限因子となっていると考えられた。その中で四万十川の影響が及ぶ観測点では、他の観測点に比べて栄養塩が相対的に豊富に存在し、基礎生産が低下する様子は見られなかった。このことは、貧栄養な黒潮の影響下にある土佐湾西部沿岸海域に相対的に豊富なケイ酸塩と硝酸塩+亜硝酸塩を含む四万十川が混入することにより、当水

域の基礎生産が維持されることを示すものである。

しかし、本研究では四万十川が土佐湾西部沿岸海域の基礎生産に果たす影響の程度について定量的に把握するには至らなかった。今後は四万十川の沿岸海域に及ぼす影響をより明確にするため、精度の高い見積もりによる河川起源と海域(黒潮)起源の栄養塩供給量の比較や、四万十川流量の年変動と栄養塩の拡散範囲との関連について把握することが必要と考えている。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、(株)西日本科学技術研究所の福留 脩文所長にご支援いただいた。試水の採取から処理に際しては、同研究所の藤田 真二博士、東 健作博士、平賀 洋之氏、岡 慎一郎氏、西村 ゆかり氏、高知大学海洋施設木下研究室の方々にご協力いただいた。上記の皆様深く感謝の意を表します。また、貴重なコメントをいただいた2名の査読者と投稿原稿をお世話いただいた編集委員の方々に感謝致します。

References

- Anderson, G. C. (1964): The seasonal and geographic distribution of primary productivity off the Washington and Oregon coasts. *Limnol. Oceanogr.*, **9**, 284-302.
- Del Amo, Y., O. Le Page, P. Tregure, B. Queguiner, A. Menesguen, and A. Aminot (1997): Impacts of high nitrate freshwater inputs on macrotidal ecosystems. I. Seasonal evolution of nutrient limitation for the diatom-dominated phytoplankton of the Bay of Brest (France). *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, **161**, 213-224.
- Edwards, A. M. C. (1973): The variation of dissolved constituents with discharge in some Norfolk Rivers. *J. Hydrol.*, **18**, 219-242.
- Eppley, R. W. (1968): An incubation method for estimating the carbon content of phytoplankton in natural samples. *Limnol. Oceanogr.*, **13**, 574-582.
- Fichez, R., T. D. Jickells, and H. M. Edmonds (1992): Algal blooms in high turbidity, a result of the conflicting consequences of turbulence on nutrient cycling in a shallow water estuary. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **35**, 577-592.
- Gilmartin, M. and N. Revelante (1974): The 'Island Mass' effect on the phytoplankton and primary production of the Hawaiian Islands. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, **16**, 181-204.
- Halim, Y. (1960): Observations on the Nile bloom of phytoplankton in the Mediterranean. *J. Cons. Int. Explor. Mer.*, **26**, 57-67.
- 浜端 悦治 (1989): 流域・水質評価モデル, p. 185-193. 河川汚濁のモデル解析, 國松 孝雄・村岡 浩爾編, 技報堂, 東京.
- 原島 省 (2003): 陸水域におけるシリカ欠損と海域生態系の変質. 水環境学会誌, **26**, 621-625.
- Harashima, A., T. Kimoto, T. Wakabayashi, and T. Toshiyasu (2006): Verification of the silica deficiency hypothesis based on biogeochemical trends in the aquatic continuum of Lake Biwa- Yodo River- Seto Island Sea, Japan. *Ambio*, **35**, 36-42.
- 平田 建正, 村岡 浩爾 (1988): 森林域における物質循環特性の溪流水質に及ぼす影響. 土木学会論文集, **399/II-10**, 131-140.
- Horne, A. J. and J. R. Goldman (1994): *Limnology*. McGraw-Hill College, New York, 480 pp.
- Howarth, R. W. (1988): Nutrient limitation of net primary production in marine ecosystems. *Ann. Rev. Ecol.*, **19**, 89-110.
- Humborg, C., V. Ittekkot, A. Cociasu, and B. V. Bodungen (1997): Effect of Danube River dam on Black Sea biogeochemistry and ecosystem structure. *Nature*, **386**, 385-388.
- 市川 忠史, 広田 祐一 (2004): 土佐湾における基礎生産の季節変動. 海の研究, **13**, 259-269.
- 今井 直, 谷村 篤, 太原 英生, 河村 章人 (2000): 河川水の流入が的矢湾の植物プランクトン現存量に及ぼす影響. 水産海洋研究, **64**, 215-223.
- 伊藤 猛夫 (1990): 四万十川の自然環境, p. 25-102. 四万十川-しぜん・いきもの-, 伊藤 猛夫編, 高知市民図書館, 高知.
- Justic, D., N. N. Rabalais, R. E. Turner, and Q. Dortch (1995): Changes in nutrient structure of river-dominated coastal waters: Stoichiometric nutrient balance and its consequences. *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, **40**, 339-356.
- 鎌谷 明善, 奥 修, 辻 久恵, 前田 勝, 山田 佳昭 (2000): 相模湾における栄養塩類の分布と消長. 日本水産学会誌, **66**, 70-79.
- 勝山 正則, 大手 信人, 浅野 友子, 小橋 澄治 (1998): 森林流域からの流出水質に降雨イベントが影響を与えるメカニズム. 京都大学農学部演習林報告, **69**, 26-37.
- Kimura, H. and T. Naganuma (2001): Thraustochytrids: a neglected agent of the marine microbial food chain. *Aquat. Ecosyst. Health Manag.*, **4**, 13-18.
- 高知県 (2001): 河川調書. 高知県土木部河川課, 高知, 106 pp.
- 高知県水産試験場 (2004): 高知県海域における漁海況と主要魚種の資源動態. 高知県水産試験場, 高知, 84 pp.
- 駒井 幸雄 (2004): 森林集水域におけるリンの収支と流出特性. 水環境学会誌, **27**, 591-594.

- Kudo, I. And K. Matsunaga (1999): Environmental factors affecting the occurrence and production of the spring phytoplankton bloom in Funka Bay, Japan. *J. Oceanogr.*, **55**, 505-513.
- 國松 孝男, 須戸 幹 (1993): 山地河川の窒素・リン・CODの濃度とその変動特性—森林 (油日岳実験流域) からの汚濁負荷流出機構 (I)—. 農業土木学会論文集, **166**, 37-44.
- Libes, S. M. (1992): *An introduction to marine biogeochemistry*. John Wiley & Sons Inc., New York, 734 pp.
- 松田 治, 山本 民次, 橋本 俊也 (1995): 沿岸フロントと栄養塩の供給機構. 沿岸海洋研究, **33**, 9-18.
- 長田 宏 (1994): 新潟沿岸域における河川水起源の栄養塩分布の季節変動. 水産海洋研究, **58**, 1-9.
- 和 吾郎 (2004): 四万十川流域の栄養塩類—源流域から沿岸域まで—. 海洋と生物, **26**, 501-507.
- 大野 晃 (2002): 四万十川と流域環境保全, p. 11-23. 流域環境の保全, 木平 勇吉編, 朝倉書店, 東京.
- 大手 信人 (2004): 森林流域における水質の形成—炭素・窒素の流出メカニズムを中心に—. 水環境学会誌, **27**, 584-590.
- Parsons, T. R., Y. Maita, and C. M. Lalli (1984): *A manual of chemical and biological methods for seawater analysis*. Pergamon Press, Oxford, 173 pp.
- Rabalais, N. N., R. E. Turner, D. Justic, Q. Dortch, W. J. Wiseman Jr., and B. K. Sen Gupta (1996): Nutrient changes in the Mississippi River and system responses on the adjacent continental shelf. *Estuaries*, **19**, 386-407.
- Redfield, A. C., B. H. Ketchum, and F. A. Richards (1963): The influence of organisms on the composition of seawater, p. 26-77. In *The sea*, Vol. 2, edited by M. N. Hill, Wiley Interscience, New York.
- Saijo, Y. and S. Ichimura (1960): Primary production in the Northwestern Pacific Ocean. *J. Oceanogr. Soc. Japan*, **16**, 29-35.
- 高橋 裕 (1990): 河川工学. 東京大学出版会, 東京, 311 pp.
- 宇野木 早苗 (2005): 河川事業は海をどう変えたか. 生物研究社, 東京, 116 pp.
- Wetzel, W. G. (2001): *Limnology: Lake and river ecosystems*. Academic Press, San Diego, 1,006 pp.
- 山本 民次 (2005): 瀬戸内海が経験した富栄養化と貧栄養化—フィールドは巨大な実験系—. 海洋と生物, **27**, 203-210.
- 山本 民次, 石田 愛美, 清水 徹 (2002): 太田川河川水中のリンおよび窒素濃度の長期変動—植物プランクトン種の変化を引き起こす主要因として—. 水産海洋研究, **66**, 102-109.
- 兪 俊宅, 中田 英昭 (2002): 黒潮の離接岸変動が沿岸の動植物プランクトン生物量に及ぼす影響. 水産海洋研究, **66**, 224-231.
- 芳村 毅, 工藤 勲 (2003): 噴火湾における河川からの栄養塩負荷量およびそれらが湾内の基礎生産に与える影響. 海の研究, **12**, 185-193.

Effects of Nutrients Supplied by the Shimanto River on Seasonal Changes of Nutrient Distributions and Primary Production in the Western Tosa Bay, Japan.

Goro Nigi[†], Izumi Kinoshita[‡], and Kimio Fukami[§]

Abstract

To understand the effect of nutrients supplied by the Shimanto River on distribution of nutrients and primary production in Tosa Bay, the nutrient distributions (nitrate plus nitrite, phosphate and silicate) and chlorophyll *a* concentrations were investigated once a month from January to December 2005. The investigation took place in the lower Shimanto River, the surface waters of the western Tosa Bay and outside of the Tosa Bay. The annual average concentrations of nitrate plus nitrite, phosphate, and silicate in the river were 14 μM , 0.9 μM , and 160 μM , respectively. The N : P : Si ratio was 160 : 1 : 1820 which indicated that the silicate and nitrate plus nitrite concentrations were much richer than the well-known cellular chemical composition of marine diatoms (N : P : Si=16 : 1 : 15). Levels of nutrients and chlorophyll *a* in the coastal waters were high in a circulation period (Nov.–Apr.) and low in a stratification period (May–Oct.). Since the N : P ratios for stratification period at the sampling stations were nearly below 10, diatoms growth in the survey area was likely to be limited by nitrogen. However, at a sampling station nearest to the mouth of the Shimanto River in the bay, concentrations of the silicate, nitrate plus nitrite, and chlorophyll *a* were usually higher than those at the other stations. The temporal and spatial variations in these nutrients at the station were found to be proportional to those in their fluxes from the Shimanto River, suggesting that nutrients from the Shimanto River contribute to the enhancement of the primary production during the stratification period in the western Tosa Bay.

Key words: Shimanto River, nutrient, Tosa Bay, primary production, N : P : Si molar ratio

(Corresponding author's e-mail address: nigi@ule.co.jp)

(Received 12 September 2007; accepted 2 June 2008)

(Copyright by the Oceanographic Society of Japan, 2008)

[†] Nishinohon Institute of Technology, 9–30, Wakamatsucho, Kochi 780–0812, Japan

[‡] Usa Marine Biological Institute, Kochi University, 194 Inoshiri, Usacho, Tosa 781–1164, Japan

[§] Graduate School of Kuroshio Science, Kochi University, 200 Monobe-Otsu, Nankoku 783–8502, Japan